



Gestion dynamique de la consommation dans un réseau de capteurs

Olesia Mokrenko

► To cite this version:

Olesia Mokrenko. Gestion dynamique de la consommation dans un réseau de capteurs. Congrès des Doctorants d'EDSYS, May 2015, Toulouse, France. hal-01164018

HAL Id: hal-01164018

<https://hal.science/hal-01164018>

Submitted on 16 Jun 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Gestion dynamique de la consommation dans un réseau de capteurs

Olesia Mokrenko (olesia.mokrenko@cea.fr)

EDSYS, Toulouse

Université de Toulouse III, Toulouse

Thèse encadrée par : Carolina Albea (LAAS/Université de Toulouse III) et Suzanne Lesecq (CEA Grenoble)

Résumé Les nœuds capteur sans fils, alimentés sur batterie, ont une durée de vie limitée ce qui est un inconvénient majeur pour leur utilisation à grande échelle. Cet article traite du contrôle de la consommation d'énergie au niveau réseau de nœuds capteur alimentés par une batterie. Le mode de fonctionnement de chaque nœud est reconfiguré dynamiquement pour garantir un nombre minimum de nœuds actifs et étendre la durée de vie du réseau. Le problème de commande sous-jacent est formulé comme un problème de contrôle prédictif avec des contraintes égalités et inégalités et des variables d'optimisation binaires, ce qui conduit à un problème MIQP. Des simulations montrent l'efficacité de la méthode de contrôle proposée.

INTRODUCTION

Les réseaux de capteurs sans fil (WSN) sont constitués de nœuds capteur (SN) habituellement basse consommation, bas-coût, avec des limitations énergétiques évidentes puisqu'ils sont généralement alimentés par des batteries. Ces nœuds sont déployés pour détecter ou mesurer un phénomène physique d'intérêt. À partir des données collectées par des points d'accès, une application est conçue pour surveiller et/ou contrôler le monde physique. Dans les deux cas, les nœuds peuvent être dédiés à des rôles spécifiques, à savoir, détection, actionnement et contrôle, ou à toute combinaison de ces rôles.

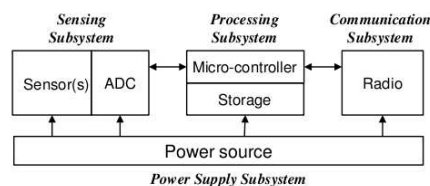


Figure 1 – Découpage fonctionnel en quatre sous-systèmes d'un nœud capteur sans fil

Dans la littérature, les SNs sont découpés en quatre sous-systèmes (SSs) principaux [15] (Fig. 1) :

- le sous-système de communication connecte le SN au réseau de manière à envoyer et/ou recevoir des informations ;
- le sous-système de calcul contient un élément de calcul (e.g., un micro-contrôleur (MCU)) associé à sa mémoire locale ;
- le sous-système de mesure contient le(s) capteur(s) et leur adaptateur (e.g., un convertisseur analogique-numérique (ADC)) ;
- le sous-système d'alimentation contient la batterie utilisée par tous les sous-systèmes.

La plupart des nœuds capteur sans fil sont alimentés par des batteries. Cela conduit à une facilité de déploiement car aucune prise de courant ou câble d'alimentation n'est nécessaire. Cependant, l'énergie disponible limitée rend la durée de vie du nœud un inconvénient majeur pour l'utilisation des nœuds capteur. En outre, cette énergie limitée peut influencer la fiabilité de la surveillance et/ou l'application de contrôle développée au dessus du réseau de capteurs. En conséquence, les nœuds doivent être conçus avec des contraintes strictes de consommation [15] afin de maximiser leur durée de vie. [13] présente différentes approches pouvant être mises en œuvre afin d'augmenter la durée de vie du réseau de capteurs sans fil. Il ne considère que les sous-systèmes de mesure et de communication. Les approches possibles de conservation de l'énergie des nœuds sont réparties en trois familles (1- systèmes à rapport cyclique donné (duty-cycled), 2- contrôlés par les données (data-driven), 3- agiles). L'expérience est réalisée à l'aide de nœuds TelosB [1]. Même si chaque sous-système du SN est efficace énergétiquement, leur association ne conduit pas nécessairement à un nœud énergétiquement efficace. Par conséquent, une politique de gestion de la puissance et/ou de l'énergie pour le SN dans son ensemble doit être mise en œuvre.

La capacité à activer et désactiver les SNs ainsi qu'à adapter leur performance individuelle à la charge de travail calculatoire est primordiale pour atteindre un fonctionnement énergétiquement efficace de l'ensemble du réseau de capteurs. Les approches de contrôle dynamique de la consommation ("Dynamic Power Management", DPM) sont déjà utilisées dans le domaine des systèmes sur puce (System-on-Chip, SoC). Elles comprennent un ensemble de techniques permettant d'atteindre l'ef-

efficacité énergétique de la plateforme de calcul en éteignant les blocs non utilisés ou en réduisant la performance des blocs du système quand ils sont au repos ou partiellement exploités. Une hypothèse sous-jacente à l'application du DPM est que le système (et ses différents blocs/composants) voient des charges de travail non uniformes au cours de la durée de fonctionnement. Cette hypothèse est valable pour la plupart des systèmes, à la fois pour des systèmes pris isolément (par exemple une plateforme SoC) et pour des systèmes inter-connectés via un réseau, ce qui est le cas d'un ensemble de SNs. Une seconde hypothèse à l'application du DPM est qu'il est possible de prévoir avec un certain degré de confiance, les fluctuations de la charge de travail. Notons que lorsque des capteurs "gourmands en énergie" [4] sont implantés dans les nœuds, une technique DPM au niveau du réseau de capteurs doit absolument être implantée de manière à obtenir une consommation énergétique du réseau optimisée. Cette gestion de la consommation du réseau global est certainement un problème beaucoup plus complexe à résoudre que celui de l'optimisation de la consommation d'un seul nœud, car le réseau de capteur constitue un système spatialement distribué, avec dans chaque nœud une horloge qui n'est pas en général synchronisée avec celle des autres nœuds.

Dans cet article, on présente une technique de contrôle dynamique de la consommation pour reconfigurer dynamiquement un réseau de capteurs afin de fournir les services et les niveaux de performance attendus au niveau de l'application construite au dessus du réseau de capteurs, avec un nombre minimum de nœuds actifs. Les nœuds capteurs sont supposés fonctionner dans différents modes. L'objectif du réseau de capteur est d'assurer un service, nommé "mission", en étendant la durée de vie du réseau avec un coût énergétique du réseau complet minimisé. La mission est exprimée par un jeu de contraintes sur les différents modes de fonctionnement des nœuds capteurs.

A. ETAT DE L'ART

La gestion de la consommation au niveau d'un réseau de capteurs a déjà été abordée dans la littérature afin d'augmenter la durée de vie des nœuds. [16] montre que l'implantation de mécanismes de compromis donnent à l'utilisateur final la possibilité de prolonger la durée de vie du réseau au détriment d'un débit inférieur ou d'un retard de transmission plus élevé. Ces mécanismes ne sont pas abordés ici mais pourraient être ajoutés à la commande proposée.

Le contrôle prédictif (Model Predictive Control, MPC) semble une technique appropriée dans notre cas car elle repose sur une politique de contrôle optimal appliquée en prédisant le comportement du système sur un horizon glissant [20]. Compte tenu de ses propriétés, le MPC peut prendre en compte

des contraintes [5] pendant la phase de conception, avec une application aux systèmes mono-entrée-mono-sortie (SISO) ou multi-entrées-multi-sorties (MIMO) [7, 21], aux systèmes non-linéaires [9, 10] et hybrides [3, 18]. Cette dernière classe de systèmes permet de décrire des dynamiques continues possiblement échantillonnées (variables réelles), discrètes, des machines à états (variables entières) et des règles logiques (variables binaires) [2]. Cela conduit à la résolution d'un problème de programmation mixte (*mixed integer program*, MIP). Un problème similaire à celui que l'on cherche à résoudre est abordé en utilisant une technique de contrôle tolérant aux pannes (Fault-Tolerant Control, FTC) [8]. Les auteurs montrent que les approches MPC peuvent résoudre des problèmes FTC en modifiant le jeu de contraintes ou en considérant différents modèles entre lesquels on commute.

Le contrôle de la consommation dans un réseau de capteurs en utilisant une technique de codage des données adapté est abordé dans [6] dont la principale contribution est d'analyser le rôle du contrôle et du codage des données lorsqu'une phase d'estimation d'état existe dans le système. L'objectif de la commande est de contraindre la variabilité du canal (i.e. assurer la Qualité de Service, QoS) et d'obtenir un compromis entre l'utilisation de la batterie et la précision de l'estimation. Le dispositif de commande est situé dans une passerelle. Il décide du niveau de puissance de transmission et le schéma de codage à utiliser par chaque nœud. Toutefois, satisfaire la QoS ne garantit pas que la "mission" telle que définie ici, est satisfaite.

Cet article est organisé comme suit. Le paragraphe (B.) aborde la modélisation du système puis les objectifs de la commande sont détaillés. La conception de la loi de commande est donnée au paragraphe (C.). Elle est basée sur une technique de MPC avec contraintes égalité et inégalité et des grandeurs de contrôle binaires. Le paragraphe (D.) présente l'implémentation de la loi de contrôle proposée sur un exemple réaliste. Un résumé des apports de cet article et les prochaines étapes de travail sont donnés au paragraphe (E.).

B. MODÉLISATION DU SYSTÈME ET OBJECTIFS DE LA COMMANDE

On considère un réseau de capteurs avec $n \in \mathbb{N}$ nœuds capteurs S_i , $i = 1, \dots, n$, alimentés par des batteries. Les nœuds sont supposés hétérogènes, i.e. leur plateforme matérielle peut être différente. En outre, les caractéristiques de la batterie peuvent être différentes.

L'architecture retenue pour la communication entre les nœuds capteur (SN) et le point de collecte est en étoile (single-hop clustered, voir Fig. 2) [25] : chaque SN envoie ses données à un nœud spécifique appelé collecteur ("sink") qui a pour mission le contrôle et le monitoring de la zone géographique où

sont placés les SNs. Ce collecteur permet de connecter cet ensemble de capteurs à un réseau plus large (Wide Area Network such). Le collecteur choisit le mode de fonctionnement de chaque nœud grâce à une stratégie de contrôle présentée ci-après.

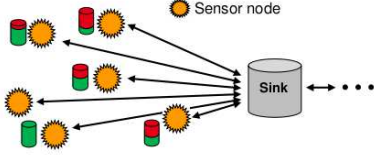


Figure 2 – Architecture en étoile pour un ensemble de nœuds connectés à un collecteur “sink”

Chaque nœud capteur peut être placé dans différents modes de fonctionnement M_j , $j = 1, \dots, m$, $m \in \mathbb{N}$ liés à l'état des quatre sous-systèmes internes (typiquement en fonctionnement (on), en sommeil (sleep), éteint (off), etc.). Un mode est caractérisé par une consommation moyenne sur une période de temps définie. Ici, les nœuds sont supposés fournir des informations redondantes, ce qui est effectivement le cas dans certains domaines applicatifs. Aussi, pour permettre à l'application construite à partir de ces informations de fournir un service donné, seul un sous-ensemble de ces données est nécessaire. Ainsi, si l'on choisit de manière appropriée le mode de chaque SN, on pourra garantir le service à rendre (i.e. la mission) tout en minimisant la consommation d'énergie, ce qui permettra d'étendre la durée de vie du réseau global de nœuds capteur.

L'énergie restant dans les SNs est modélisée par

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \quad (1)$$

avec $x_k \in \mathbb{R}^{n,+}$ l'énergie disponible dans la batterie du nœud S_i , $i = 1, \dots, n$, à l'instant k . Bu_k est la matrice de contrôle. Chaque composante b_{ij} représente l'énergie moyenne consommée par S_i dans le mode M_j dans l'intervalle de temps $[T_{PW}k, T_{PW}(k+1)]$, avec T_{PW} la période de prédiction, voir le Tableau 1.

Tableau 1 – Consommation d'énergie moyenne pour chaque SN S_i dans les modes M_j sur la période T_{PW}

Nœud	Mode M_1	...	Mode M_m	
S_1	b_{11}	...	b_{1m}	$= B_1$
\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
S_n	b_{n1}	...	b_{nm}	$= B_n$

Notons que le passage d'un mode à l'autre a un coût supplémentaire qui est pris en compte dans b_{ij} . La batterie a une capacité limitée. Aussi, pour S_i :

$$0 \leq x^i \leq X_{max}^i \quad (2)$$

La charge initiale (i.e. à l'instant $k = 0$) pour S_i est notée X_0^i . La matrice d'état $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ est égale à la

matrice identité \mathbf{I}_n . $u_k = [u_1^T, \dots, u_n^T]^T \in \{0, 1\}^{nm}$ est le vecteur de contrôle avec $u_i\{j\} \in \{0, 1\}$. Chaque sous-vecteur u_i représente le mode de S_i . Ce dernier a un unique mode de fonctionnement à l'instant k . Aussi, pour $i = 1, \dots, n$, un jeu de contraintes est défini :

$$\sum_{j=1}^m u_i\{j\} = 1 \quad (3)$$

Pour remplir la “mission” fixée tout en diminuant la consommation d'énergie, un sous-ensemble de $d_j \in \mathbb{N}$ SNs est placé dans le mode M_j . Aussi, un jeu de contraintes supplémentaire est défini :

$$\sum_{i=1}^n u_i\{j\} = d_j \quad (4)$$

Objectifs pour la loi de contrôle Une méthode de contrôle de la consommation d'énergie doit être implantée au niveau du réseau afin d'augmenter sa durée de vie tout en garantissant qu'il remplit les fonctions pour lesquelles il a été déployé. La capacité du réseau à remplir la *mission* est liée à la qualité de service (QoS), avec des contraintes fonctionnelles supplémentaires. u_k prend ses valeurs dans l'ensemble $\{0, 1\}$, fixant le mode de fonctionnement de chaque nœud, sous les contraintes (3) et (4). Dans un réseau de n SNs délivrant des données fortement corrélées, la consommation globale peut être réduite si une stratégie de gestion est mise en place pour délivrer juste assez d'information pour l'application construite au dessus du réseau. Aussi, $N_{on} < n$ sont placés dans le mode *on* tandis que $n - N_{on}$ nœuds sont dans le mode *Sleep* réputé consommer moins.

C. CONCEPTION DE LA LOI DE CONTRÔLE

La minimisation de la consommation de (1) est exprimée comme un problème de programmation quadratique (QP). Le problème de contrôle sous-jacent implique la minimisation d'une fonction coût, avec des contraintes égalité et inégalité. L'utilisation du MPC avec des dynamiques continues et des variables de contrôle binaires est apparu récemment [2, 3]. Malheureusement, le problème d'optimisation associé est un problème de programmation quadratique mixte (MIQP), plus complexe à résoudre qu'un problème de programmation quadratique (QP) standard.

On suppose maintenant que la paire (A, B) dans (1) est stabilisable. A chaque instant de décision, l'état courant $x_k = x_{k|k}$, supposé connu, peut être utilisé pour déterminer la séquence de contrôle optimale $\mathbf{u}^* = [u_{k|k}^T, \dots, u_{k+N_p-1|k}^T]^T$ via la minimisation de :

$$\mathbf{u}^* = \arg \min_u \sum_{i=0}^{N_p-1} x_{k+i|k}^T Q x_{k+i|k} + \sum_{i=0}^{N_u-1} u_{k+i|k}^T R u_{k+i|k} \quad (5)$$

sous contraintes

$$\begin{cases} x_{k+i+1|k} = Ax_{k+i|k} + Bu_{k+i|k}, & i = 1, \dots, N_p - 1 \\ u_{k+i|k} = 0, & i = N_u, N_u + 1, \dots, N_p - 1 \\ u_{k+i|k} \in \{0, 1\} \\ X_{min} \leq x_{k+i|k} \leq X_{max}, & i = 1, \dots, N_p - 1 \end{cases} \quad (6)$$

où $Q = Q^T \geq 0$ et $R = R^T > 0$ sont les matrices de pondération, X_{min} et X_{max} sont les bornes sur l'état $x_{k+i|k}$, et la paire $(Q^{1/2}, A)$ est détectable. Les horizons de prédiction N_p et de contrôle $N_u \leq N_p$ ainsi que les matrices Q et R sont les degrés de liberté de la loi de contrôle.

En utilisant l'état étendu $\mathbf{x} = [x_{k+1|k}^T, \dots, x_{k+N_p|k}^T]^T$ et en notant $x_{k|k} = x$, la fonction coût est réécrite sous forme matricielle :

$$\begin{aligned} & \arg \min_{\mathbf{u}} \mathbf{x}^T \bar{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \bar{R} \mathbf{u} \\ & \text{sous contraintes : } \begin{cases} \mathbf{u} \in \{0, 1\} \\ \bar{F}_{in_x} \mathbf{x} \leq \bar{G}_{in_x} \\ \bar{F}_{eq_u} \mathbf{u} = \bar{G}_{eq_u} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

avec $\bar{Q} = \text{diag}[Q, \dots, Q]$, $\bar{R} = \text{diag}[R, \dots, R]$. Les contraintes sont décrites par $\bar{F}_{in_x} \in \mathbb{R}^{s \times n}$, $\bar{G}_{in_x} \in \mathbb{R}^s$, $\bar{F}_{eq_u} \in \mathbb{R}^{p \times r}$ et $\bar{G}_{eq_u} \in \mathbb{R}^p$, $p = (N_p - N_u)nm$, $r = N_p nm$, $s = N_p q$ qui expriment les contraintes dans (2), (3) et (4) sur x et $u_{k|k} \forall k$.

L'équation (1) est exprimée sous forme matricielle compacte :

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \Phi \mathbf{x} + \Gamma \mathbf{u} \\ \Phi &= \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \vdots \\ A^{N_p} \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 \\ AB & B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N_p-1} & A^{N_p-2} & \dots & A^{N_p-N_u} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Aussi, (7) est un MIQP (voir par ex. [21])

$$\begin{aligned} & \arg \min_{\mathbf{u}} \mathbf{u}^T H \mathbf{u} + 2\mathbf{u}^T F x \\ & \text{subject to : } \begin{cases} \mathbf{u} \in \{0, 1\} \\ \bar{F}_{in_x} \Gamma \mathbf{u} \leq \bar{G}_{in_x} - \bar{F}_{in_x} \Phi x \\ \bar{F}_{eq_u} \mathbf{u} = \bar{G}_{eq_u} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

avec $H = \Gamma^T \bar{Q} \Gamma + \bar{R}$, $F = \Gamma \bar{Q} \Phi$.

D. APPLICATION

Pour illustrer notre approche, on considère $n = 6$ SNs et un concentrateur. Chaque nœud S_i , $i = 1, \dots, 6$, peut être placé dans un unique mode de fonctionnement parmi 3 modes possibles M_j , $j = 1, \dots, 3$ (voir Tableau 2) :

- M_1 est le mode *On* dans lequel le nœud acquiert des mesures, les transmet, reçoit des informations, surveille l'état de sa batterie, et peut effectuer des calculs. La figure 3 montre la consommation typique du nœud dans ce mode

(image du courant) : le se réveille, passe en état Rx en attendant un beacon. Il collecte les informations (mesures, état de la batterie) et prépare la trame à transmettre, transmise au concentrateur ;

- M_2 correspond au mode *Sleep* du nœud : seul l'oscillateur interne est alimenté pour garantir l'horloge ;
- M_3 correspond à la situation *total Switch off*. En pratique, cela correspond à une situation de défaut où la batterie est complètement vide, ou bien le nœud n'est plus accessible. Le nœud peut sortir de M_3 par exemple quand la communication est rétablie.

Mode	Proc.	Com.	Sensing
M_1	Active	Tx / Rx	On
M_2	Sleep	Off	Off
M_3	Off	Off	Off

Tableau 2 – Modes de fonctionnement pour S_i

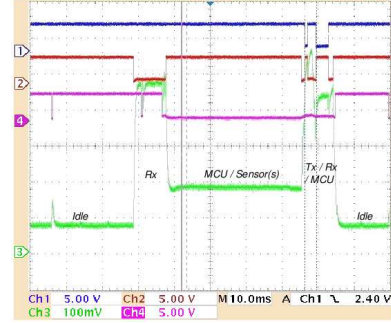


Figure 3 – Cycle typique de consommation dans le mode M_1 (courant)

Dans cet exemple, la mission est découpée en deux phases correspondant aux heures de travail et aux heures creuses. Aussi, les contraintes définissant la mission évoluent au cours du temps :

$$\begin{aligned} \text{jour (8h – 18h)} : d_1 &= 3 \text{ nœuds en } M_1 \\ \text{nuit (18h – 8h)} : d_1 &= 1 \text{ nœud en } M_1 \end{aligned} \quad (10)$$

La période d'échantillonnage pour la mesure au niveau des nœuds, en mode M_1 , est $T_s = 60s$. Dans ce mode, le nœud reçoit/envoie des informations du/vers le concentrateur, et effectue la mesure. Les autres nœuds sont placés dans le mode M_2 . Dans ce mode, ils se réveillent toutes les heures $T_{PW} = 1h$ pour transmettre l'état de leur batterie. Cela correspond en fait à une phase de mesure avec $y_k = x_k$. M_3 correspond au mode en défaut, imposé quand $\frac{X_0^i}{X_{max}^i} \leq \delta$, ce qui correspond à une batterie quasiment vide.

A k_0 , on suppose que les batteries ont suffisamment d'énergie pour que n'importe S_i puisse remplir la *mission*. Pendant la période jour (resp. nuit), trois (resp. un) nœuds sont en mode M_1 , les 3 (resp. 5) restants étant placés en mode M_2 . Dès que la

capacité (relative) de la batterie du nœud S_f est inférieure à $\delta = 0.1$, S_f est placé en mode M_3 , avec $u_f(3) = 1$, et un jeu de contraintes modifié. Alors, la loi de contrôle réassigne les modes des capteurs restant de manière à garantir la mission en minimisant la consommation énergétique.

Pour le système (1), $A = \mathbf{I}_6$. Les composantes de B sont calculées à partir des valeurs du tableau 3, en tenant compte de la tension nominale de la batterie associée (voir tableau 4). Ces valeurs numériques sont dérivées de [22]. Le tableau 4 donne aussi la capacité initiale des batteries, obtenues à partir de [24]. Q and R sont choisies égales à :

$$Q = \mathbf{0}_{6 \times 6}; \quad R = B^T B \quad (11)$$

avec $\mathbf{0}$ la matrice nulle. $Q = \mathbf{0}_{6 \times 6}$ vient du fait que la dynamique de l'état devrait évoluer le plus lentement possible possible [23]. Le choix de R implique que les nœuds plus consommant sont pénalisés.

Tableau 3 – Consommation moyenne ($mA \cdot h$) de S_i dans le mode M_j sur la période T_{PW}

Nœud	Mode M_1	Mode M_2	Mode M_3
S_1	6.56	0.92	0
S_2	8.72	1.11	0
S_3	7.75	1.08	0
S_4	9.43	1.26	0
S_5	7.54	1.29	0
S_6	7.20	1.03	0

Tableau 4 – Caractéristiques des batteries (chaque nœud est équipé de 2 batteries AA)

Nœud	Type	Nom. Volt. [V]	Capacité $X_{max}^i/2$ [mA·h]	Capacité int. $\frac{X_0^i}{X_{max}^i}$
S_1	NiCd	1.2	1100	1
S_2	NiCd	1.2	1100	0.8
S_3	NiMH	1.2	2500	1
S_4	NiMH	1.2	2500	0.7
S_5	Li-ion	3.7	740	0.9
S_6	Li-ion	3.7	740	1

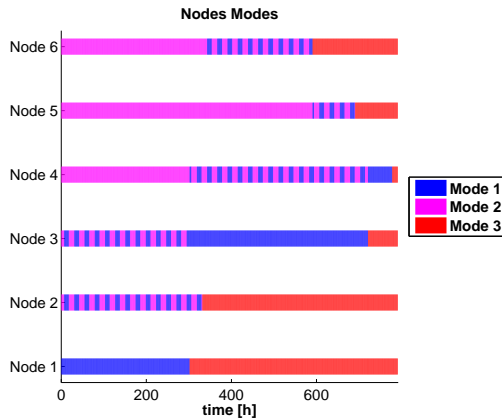
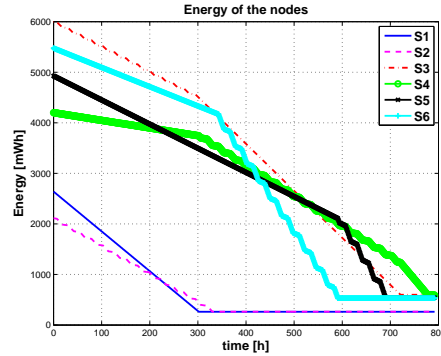
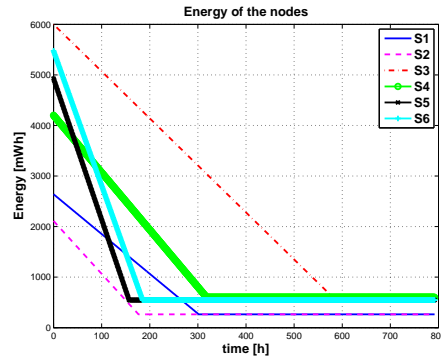


Figure 4 – Modes de fonctionnement des nœuds capteur en fonction du temps avec DPM (simulation démarrée à minuit)

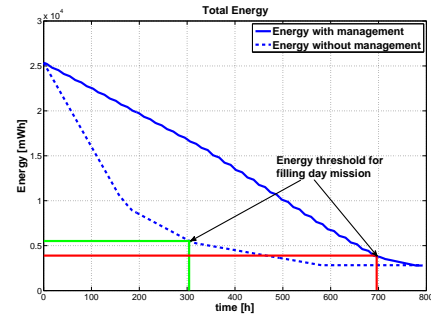
L'écriture des différentes équations pour la résolution du problème de commande découle directement de la définition de la mission, des horizons de prédiction et de contrôle choisis égaux à $N_p = 5$ et $N_u = 1$ respectivement. Comme le système à contrôler présente une dynamique lente, cet horizon semble suffisant. La période de décision (c'est à dire la période de temps où la commande est exécutée) est $T_{PW} = T_{mb} = 1h$. Ainsi, le problème de MIQP est résolu en ligne à chaque temps de la décision $T_{PW}k$.



(a) Évolution de l'énergie dans les nœuds avec stratégie DPM



(b) Évolution de l'énergie dans les nœuds sans DPM



(c) Évolution énergie totale (avec et sans DPM)

Figure 5 – Résultats de simulation

Le contrôle de la consommation au niveau du réseau de capteurs est simulé dans l'environnement MATLAB. Le problème MIQP est résolu avec le solveur Yalmip [19]. La figure 4 donne les résultats de

simulation : on y voit l'évolution du nombre de SNs, dépendant de la période jour/nuit et de l'état des batteries.

L'état des batteries avec la loi de contrôle est donné sur la figure 5a tandis que la figure Fig. 5b montre l'énergie dans les batteries sans stratégie de contrôle, i.e. quand tous les nœuds sont en mode *on*. Avec la stratégie proposée ici, la durée de vie est plus que doublée (avec 691h à comparer à 302h) car les nœuds non indispensables sont en mode *sleep*. Sur la figure 5c, on compare l'énergie totale consommée par le réseau avec et sans stratégie de contrôle.

E. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans cet article, une stratégie de contrôle de la consommation au niveau d'un réseau de nœuds capteur est proposée. L'énergie dans les batteries des

nœuds est modélisée avec une représentation d'état. Le contrôle résultant, basé sur du MPC est exprimé comme un problème MIQP. Les objectifs de contrôle sont exprimés par la *mission* qui définit le nombre minimum de nœuds actifs nécessaires pour que l'application construite à partir des mesures fournies par le réseau puisse être satisfaite : seuls les nœuds indispensables à la mission sont en mode *On* tandis que les autres sont placés en *Sleep*. Ainsi, la durée de vie du réseau global peut être étendue. Des tests en simulation ont été réalisés pour $n = 6$ SNs et l'extension à un plus grand nombre de nœuds est sans difficulté. Les résultats obtenus montrent l'intérêt de la méthode de contrôle proposée. L'approche présentée ici a été testé en vraie grandeur, dans des conditions d'utilisation réelles. Les résultats obtenus seront présentés pendant l'exposé oral.

RÉFÉRENCES

- [1] <http://www.memsic.com>.
- [2] M. Morari A. Bemporad. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. *Automatica*, 1999.
- [3] M. Morari A. Bemporad. Predictive control of constrained hybrid systems. In *Nonlinear model predictive control*. 2000.
- [4] M. Di Francesco M. Roveri C. Alippi, G. Anastasi. Energy management in wireless sensor networks with energy-hungry sensors. *IEEE Inst. & Measurement Magazine*, 2009.
- [5] C. Rao P. Scokaert D. Mayne, J. Rawlings. Constrained model predictive control : Stability and optimality. *Automatica*, 2000.
- [6] A. Ahlen D. Quevedo, J. Ostergaard. Power control and coding formulation for state estimation with wireless sensors. 2013.
- [7] C. Alba E. Camacho. *Model predictive control*. Springer, 2013.
- [8] D. de la Pena E.F. Camacho, T. Alamo. Fault-tolerant model predictive control. In *IEEE Conf. ETFA*, 2010.
- [9] A. Zheng F. Allgöwer. *Nonlinear model predictive control*. Birkhäuser Basel, 2000.
- [10] J. Qin J. Rawlings S. Wright F. Allgöwer, T. Badgwell. Nonlinear predictive control and moving horizon estimation—an introductory overview. In *Advances in control*. 1999.
- [11] D. Theilliol F. Bicking, Ph. Weber. Reliability importance measures for fault tolerant control allocation. In *Conference SysTol* 2013, 2013.
- [12] O. Abari A. Chandrakasan V. Stojanovic F. Chen, F. Lim. Energy-aware design of compressed sensing systems for wireless sensors under performance and reliability constraints. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 2013.
- [13] M. Di Francesco A. Passarella G. Anastasi, M. Conti. Energy conservation in wireless sensor networks : A survey. *Ad Hoc Networks*, 2009.
- [14] D. Puccinelli S. Giordano Hoang Anh Nguyen, A. Forster. Sensor node lifetime : an experimental study. In *PERCOM Workshops*, 2011.
- [15] Y. Sankarasubramaniam E. Cayirci I. Akyildiz, W. Su. Wireless sensor networks : a survey. *Computer networks*, 2002.
- [16] S. He Y. Sun P. Thulasiraman X. Shen J. Chen, W. Xu. Utility-based asynchronous flow control algorithm for wireless sensor networks. *IEEE J. on Selected Areas in Communications*, 2010.
- [17] F. Lamnabhi-Lagarrigue J. Lunze. *Handbook of hybrid systems control : theory, tools, applications*. Cambridge Univ. Press, 2009.
- [18] M. Lazar. Model predictive control of hybrid systems : Stability and robustness, 2006.
- [19] J. Löfberg. Yalmip : A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In *CACSD Conference*, 2004.
- [20] J. Doná M. Seron, GC Goodwin. Characterisation of receding horizon control for constrained linear systems. *Asian J. of Control*, 2003.
- [21] J. Maciejowski. *Predictive control : with constraints*. Pearson education, 2002.
- [22] T. Val N. Fourty, A. Van Den Bossche. An advanced study of energy consumption in an iee 802.15. 4 based network : Everything but the truth on 802.15. 4 node lifetime. *Computer Communications*, 2012.
- [23] D. Lawrence R. Williams. *Linear state-space control systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [24] P. Kulkarni S. Sudevalayam. Energy harvesting sensor nodes : Survey and implications. *IEEE Com. Surveys & Tutorials*, 2011.
- [25] C. Rosenberg V. Mhatre. Homogeneous vs heterogeneous clustered sensor networks : a comparative study. In *IEEE Int. Conf. on Communications*, 2004.